

学校编码: 10384

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

学 号: X2006223024

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

工 程 硕 士 学 位 论 文

## 基于蚁群算法的柔性车间作业调度问题研究

Study on Flexible Job Shop Scheduling Problems  
Based on Ant Colony Optimization

石 飞 腾

指导教师姓名: 罗德林 副教授

宋成刚 高级工程师

专 业 名 称: 控 制 工 程

论文提交日期: 2 0 1 0 年 5 月

论文答辩日期: 2 0 1 0 年 6 月

学位授予日期: 2 0 1 0 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2010 年 5 月

基于蚁群算法的柔性车间作业调度问题研究

石飞腾

指导教师: 罗德林 副教授 宋成刚 高级工程师

厦门大学

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

- ☐ 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于  
年 月 日解密，解密后适用上述授权。
- ☐ 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

## 摘 要

一直以来,车间调度都是生产系统中的一个核心环节。对 JSSP 的研究具有重要的理论和现实意义,与此同时车间调度度问题又是一个错综复杂的 NP-hard(Non-deterministic polynomial-Hard,非确定性多项式)问题。近年来,许多的算法应用到调度问题的研究中。蚁群算法作为一种新兴的智能算法,因其具有良好的新解发现能力、较强的鲁棒性、本质的并行性等特点逐渐成为研究的热点。

本文的研究就是围绕蚁群算法在生产调度中的应用而展开的,所做的主要工作如下:

(1) 介绍车间调度和蚁群算法研究的目的、意义及其重要性,同时,也简略介绍了国内外的发展现状。

(2) 提出基本蚁群算法的物理学与数学原理,分析了蚁群算法的特性,探讨了基本蚁群算法的实现步骤及参数设置。

(3) 描述了传统车间调度的分类、约束条件及评价标准,介绍了柔性及柔性资源,进而提出了柔性车间调度问题(FJSSP)。

(4) 将一种混合蚁群算法运用于柔性车间作业调度,并将作业车间调度问题中的完工时间最短,加工时间大致相当,工件在规定时间内完成作为算法的评价指标,通过对 10\*10 和 8\*8 优化实例的仿真计算,验证了该算法在作业车间调度应用中的有效性。较好地克服了传统蚁群算法在解决作业车间调度问题时的“早熟”和稳定性差,收敛速度慢的缺点。

(5) 最后对车间作业调度的策略和蚁群算法改进进行一个总结与展望。

本文研究成果对蚁群算法的研究有一定的参考价值,并对建立现代优化调度系统有现实的理论指导意义和应用价值。

**关键词:** 蚁群算法; 作业调度; 柔性资源

## Abstract

The Job-shop scheduling problem(JSSP) is a core link in the production management, Consequently, the research of JSSP has been an attractive subject in academic and industrial communities, and has great importance in engineering applications. But scheduling problem is combinatorial optimization problem, which belongs to NP hard problems. In recent years, most algorithms was tried for solving the JSSP. The ACO system, a new intelligent algorithm has become the research focus because of its great ability of finding new solutions, robustness and essential parallelism.

The author has made some research in the following aspects:

(1)Introduction to the concept, characteristics, objectives and critical positions of JSSP and ACO system. The paper also gives a brief survey on the methods and developments about JSSP and ACO inside and outside country briefly;

(2)Explains the basic ACO's physics and mathematics principle, analyses the special capability in ACO system, expatiates the mathematics step and the parameter setting.

(3)Explains the traditional JSSP's assortment、restrict term and the estimating standard,also introduces the flexible and flexible resource to reach the FJSSP.

(4)Through the research of FJSSP,one improved hybrid ant colony optimization(HACO)is obtained, the fitness of algorithm is represented by the shortest completion time of jobs, the identical machine time,the calm finishing time window. simple to be 10\*10 and 8\*8 JSSP examples testify the effectiveness of the ACO system for FJSSP.It can avoid such disadvantages as premature convergence, low convergence speed and low stability.

(5) Finally,the author make a conclusion and advice for the strategy of JSSP and also the improvement of ACO system.

The paper has some reference value on research of the Ant Colony Algorithms system and makes some contribution to the development of JSSP in the theoretical research and the applied value.

**Key words:** Ant Colony Optimization; Job Shop; Scheduling; Flexible Resource.

## 目 录

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	II
第 1 章 绪论 .....	1
1.1 车间调度问题研究 .....	1
1.1.1 车间调度问题的研究背景及意义 .....	1
1.1.2 传统车间调度问题的研究现状与方法 .....	2
1.1.3 柔性车间调度问题的研究历史与现状 .....	2
1.1.4 车间调度问题研究的发展趋势 .....	5
1.2 蚁群算法研究 .....	6
1.2.1 蚁群算法的研究现状 .....	6
1.2.2 蚁群算法的应用领域 .....	7
1.2.3 蚁群算法的研究趋势 .....	9
1.3 本研究的主要内容和组织架构 .....	10
第二章 蚁群算法基本理论 .....	12
2.1 基本蚁群算法的原理及研究机制 .....	12
2.1.1 基本蚁群算法的物理学原理 .....	12
2.1.2 基本蚁群算法的数学原理 .....	13
2.1.3 蚁群算法与真实蚂蚁的异同点 .....	14
2.1.4 基本蚁群算法的研究机制 .....	14
2.2 蚁群算法的具体实现 .....	16
2.2.1 蚁群算法求解 JSSP 的实现步骤 .....	16
2.2.2 蚁群算法求解 TSP 的实现步骤 .....	17
2.3 蚁群算法的参数选取原则 .....	18
2.4 蚁群算法的特性与缺点 .....	21
2.4.1 蚁群算法的特性 .....	21

2.4.2 蚁群算法的缺点	23
<b>第三章 柔性车间作业调度问题描述</b>	<b>24</b>
3.1 传统车间作业调度描述	24
3.1.1 车间作业调度的分类	24
3.1.2 车间作业调度的约束条件	24
3.1.3 车间作业调度的评价标准	25
3.1.4 车间作业调度的表示方法	26
3.2 柔性车间作业调度方法	27
3.2.1 柔性概述	27
3.2.2 柔性资源概述	30
3.2.3 柔性车间作业调度方法(FJSSP)概述	30
<b>第四章 求解多目标柔性车间调度问题的混合蚁群算法设计</b>	<b>33</b>
4.1 求解多目标柔性车间调度问题描述	33
4.2 求解多目标柔性车间调度问题的混合蚁群算法(HACO)	34
4.2.1 基于蚁群算法的工序分配	34
4.2.2 工序加工调度算法	36
4.2.3 求解多目标柔性车间调度问题的混合蚁群算法	37
<b>第五章 仿真与分析</b>	<b>39</b>
<b>第六章 总结与展望</b>	<b>46</b>
6.1 本文的研究内容总结	46
6.2 今后的研究展望	47
参考文献	48
致谢语	51



# Contents

<b>Abstract in Chinese .....</b>	<b>I</b>
<b>Abstract in English.....</b>	<b>II</b>
<b>Chapter1 Preface.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Research of Job-Shop Scheduling Problem(JSSP) .....</b>	<b>1</b>
1.1.1 Backround and importance of JSSP.....	1
1,1,2 Progress of the JSSP methods study .....	2
1.1.3 Background and currently of FJSSP .....	4
1.1.4 the prospects of JSSP.....	5
<b>1.2 Research of ant colony optimization(ACO) .....</b>	<b>6</b>
1.2.1 Backround and importance of ACO .....	6
1.2.2 Application area of ACO .....	7
1.2.3 the prospects of ACO .....	9
<b>1.3 Paper main contents and organization .....</b>	<b>10</b>
<b>Chapter2 Basic of ACO .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Basic methods and research construction of ACO .....</b>	<b>12</b>
2.1.1 Physics principle of ACO.....	12
2.1.2 Mathematics principle of ACO .....	13
2.1.3 The distinguish of ACO and real ant colony .....	14
2.1.4 Research construction of ACO .....	14
<b>2.2 Realize of ACO.....</b>	<b>16</b>
2.2.1 ACO for JSSP .....	16
2.2.2 ACO for TSP.....	17
<b>2.3 Principle for selecting parameter of ACO .....</b>	<b>18</b>
<b>2.4 The advantage and disadvantage of ACO .....</b>	<b>21</b>
2.4.1 The advantage of ACO .....	21
2.4.2 The disadvantage of ACO.....	23
<b>Chapter3 Description of flexible job-shop scheduling problem .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1 Description of JSSP .....</b>	<b>24</b>
3.1.1 Assortment of JSSP .....	24

3.1.2 Restrict rules of JSSP .....	24
3.1.3 Choosing standard of JSSP .....	25
3.1.4 Gantee Chart to JSSP .....	26
<b>3.2 Flexible Job-Shop scheduling Problem(FJSSP) .....</b>	<b>27</b>
3.2.1 Description of Flexible .....	27
3.2.2 Description of Flexible resource .....	30
3.2.3 Description of FJSSP .....	30
<b>Chapter4 Solving FJSSP by Hybrid Ant Colony Optimization .....</b>	<b>33</b>
<b>4.1 Description of solving FJSSP .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2 Methods of HACO .....</b>	<b>34</b>
4.2.1 Machine distribution by basic of ACO .....	34
4.2.2 Machine controlling scheduling Agrithm .....	36
4.2.3 Solving of FJSSP by Hybrid Ant Colony Optimization .....	37
<b>Chapter5 Experimental results and analysis .....</b>	<b>39</b>
<b>Chapter6 Conclusions and propects .....</b>	<b>46</b>
6.1 Main work and ahievements .....	46
6.2 conclusions and prospects .....	46
<b>References .....</b>	<b>48</b>
<b>Acknowledgements .....</b>	<b>51</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 车间调度问题研究

#### 1.1.1 车间作业调度问题的研究背景及意义

21 世纪的全球制造业正面临着越来越激烈的全球化市场竞争，传统的生产线主要以人工为主，效率低，成本高，难以适应市场多变与复杂的需求，而知识经济的时代浪潮正冲击着企业日常的生产经营活动。人类社会在享受着各类工业产品带来的高度物质文明的同时，又渴望获得更新更丰富的物质产品来满足人类不断增长的物质需求。为此，制造业企业必须不断推出创新的产品(product)、以更短的新产品上市时间(time to market)、更优的产品质量(quality)、更低的产品成本(cost)、更好的服务(sevrice)和满足环保要求(enviornment)“PTQCSE”六要素去提高企业的生产、经营和管理效率，从而提高企业的核心竞争优势。

就中国经济发展现状而言，政府为了改进国内企业的管理水平，近年来，已花费了数十亿美元引进了各种管理软件，但都因为没有车间级的基础生产技术(特别是优化的调度技术)的支持，而没能得到有效应用。我国的制造业急需有自己特色的优化生产调度技术。

作为一类特殊的调度问题，车间调度是在交货期、工艺路线、机械配置等约束条件下，对各工件的具体操作（使用哪些机械、不同操作间的先后顺序、开始加工时间等）进行安排，以使某些性能指标最优（如最大完工时间最短，制造成本最低等）的一类问题。

车间调度问题(Job-Shop Scheduling problem, JSSP)是一类应用很广泛的问题，其研究不仅具有重要的理论意义，而且还具有相当大的现实意义。这是由于:一方面，车间调度问题作为生产管理中最困难的问题，而且也已证明属于NP(Nondeterministic polynomial-bounders)一 hard 问题，目前尚无有效的求解策略，而对车间调度问题进行研究不仅可以寻找有效的求解策略，推进相关算法的研究，如遗传算法、神经网络、蚁群算法等，而且还能在此基础上提出新的算法，这为其它领域类似问题的解决提供了条件和手段。另一方面车间调度问题的解决本身

具有很大的现实意义。一个好的车间调度方案，不仅可以降低企业的生产成本，而且还可以提高企业的按时交货能力，从而能够增强企业的竞争力。

### 1.1.2 传统车间调度问题的研究方法

1954 年, Johnson 研究了两台机床的流水车间调度问题, 这标志着调度理论研究的开始。1960 年, Giffler 和 Thompson 提出用于生产调度的优先分派规则方法<sup>[1]</sup>。1966 年 Gere, W.S. 提出了用于 JSSP 一组基于优先分派规则的启发式算法<sup>[2]</sup>。Balas 在 1969 年第一个基于析取图(Disjunctive Graph)句的枚举方法来处理机器的调度问题<sup>[3]</sup>。研究学者克服了 JSSP 问题的复杂性和困难性, 历经 40 多年不懈研究, 车间调度领域取得了丰硕的成果, 这一时期产生了很多重要的调度方法。

#### (1) 基于启发式规则的方法

对生产加工任务进行调度的最传统的方法是使用调度规则, 因为启发式调度规则简单, 易于实现, 计算复杂度低等原因, 故在生产中得到了广泛的应用。但启发式规则一般不具备全局优化的特点。许多年来, 学者们进行了广泛的研究, 并不断创造出新的调度规则, 主要分为简单规则、复合规则、启发式规则三类。

#### (2) 基于运筹学的方法

运筹学方法是將生产调度问题简化成为数学规划模型, 采用基于枚举思想的分枝定界法或动态规划法进行求解。这类方法通常是一种解决较小规模调度问题的有效算法, 但由于生产调度是一类组合优化问题, 属于 NP 完全问题, 随着问题规模的扩大, 会发生组合爆炸, 以至很难用来求解大规模的调度问题。此外, 就是基于运筹学的方法自身的局限性, 人们在运用这种方法时, 不得不附加一些脱离现实环境的假设, 这在一定程度上导致了其理论研究和实际应用的差距。

#### (3) 拉格朗日松弛法

拉格朗日松弛法能为复杂的规划问题提供好的次优解, 并对解的次优性进行定量评估, 所以成为解决调度问题的一种重要方法<sup>[4]</sup>。但与其它定界法相比, 拉格朗日松弛法更加耗时。

#### (4) 人工神经网络法

Hopfield 神经网络模型的出现为解决调度问题开辟了一条新的途径, 其应用于生产调度问题的方式主要有三种: 一是利用其并行计算能力, 求解优化调度, 以克服调度的 NP 完全问题; 二是利用其自学习能力, 从优化轨迹中提取调度知识; 三

是利用神经网络来描述调度约束或是调度策略, 以实现对生产过程的可行或次优调度。但神经网络法也存在着许多的缺陷, 如涉及的变量太多, 计算效率低, 很难解决实际的调度问题<sup>[5]</sup>。

#### (5) 基于人工智能的方法

人工智能的方法就是利用模型和知识, 通过模拟和推理等手段为人的决策行为提供支持, 从而使人们可以根据车间的不同情况做出相应的更符合实际的决策。近年来, 基于知识的智能调度系统的方法和研究取得了较大的发展, 其中最常见的就是专家系统。专家系统作为一种好的调度方法也存在着不容忽视的缺点: 一是对新的调度环境的适应性差; 二是开发周期长, 费用高; 三是专家系统是基于知识的系统, 但是人们对经验和知识的获取受到历史条件的限制。比较著名的专家系统有: 1515、MPECD、OPIS、SONIA 等<sup>[6]</sup>。

#### (6) 基于离散事件动态系统的解析模型法

由于制造系统是一类典型的离散事件系统, 因此, 可以用研究离散事件系的方法和解析模型来探讨生产调度问题。诸如 QN、极大代数法、动态规划法、Perti 网等<sup>[7]</sup>, 其中前三者都只适合于制造系统的性能分析。Perti 网作为一种图形建模工具, 能形象地表示和分析 FMS 生产线中加工过程地并发和分别的特以及多项作业共享资源时的冲突现象, 建模能力强, 能快速反映制造系统实时度的离散性和随机性, 所以将它与其它方法结合相结合在调度问题中得到了广泛应用。

#### (7) 局域搜索法

近年来, 一些高级局域搜索法由于具有普遍适用性和较低的经验复杂性等优点, 得到了广泛的应用。这种技术是随机性和启发式的, 当搜索解空间时, 它们仅对选定的成本函数值的变化做出响应, 因而通用性强<sup>[8]</sup>。尽管这种技术需要的运行时间比启发式长, 但解的质量能得到显著的提高。常用的几种方法如下:

##### A) 模拟退火法 (Simulated Annealing Algorithm, SA)

模拟退火方法将组合优化问题与统计力学的热平衡问题类比, 通过模拟退火过程, 可找到全局最优解。但它的收敛速度慢, 很难用于实时动态调度环境。

##### B) 禁忌搜索法 (Tabu Search)

禁忌搜索是由 Glover 提出的用于解决组合优化问题的一种高级启发式方法。Tairid 提出了解决流水车间调度问题的禁忌搜索算法<sup>[9]</sup>。

### C) 遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)

遗传算法成为近年来解决作业调度问题的最主要方法。与其它方法相比,遗传算法的优越性主要表现在:搜索过程中能以较大的概率找到全局最优解;具有并行性,非常适合于大规模并行分布处理;易于和别的技术(如神经网络,启发式规则等)相结合,形成性能更优的算法。但遗传算法的搜索效率低,易过早收敛<sup>[10]</sup>。

### D) 蚁群算法 (Ant Colony Optimization, ACO 算法)

蚁群算法,最初是由意大利学者 Dorigo M. 博士于 1991 年首次提出<sup>[11]</sup>,其本质是一个复杂的智能系统,本论文将会在以下章节重点谈及。

### E) 人工神经网络 (Neural Network)

人工神经网络是基于生物学中的神经网络的基本原理而建立的。人工神经网络通过自身的学习机制,不断地更新相应权值来获得能量函数,进而得到相应问题的解。人工神经网络中的 Hopfield 网络因其可以通过硬件实现,而在生产调度领域被广泛研究。

### (8) 仿真调度方法

仿真模型可以描述和定量评估复杂的制造系统,为实际调度采用合适的调度算法提供依据。但应用仿真进行生产调度的费用高,仿真的准确性受程序员判断能力和技能的限制,很难从特殊的实验中提炼出一般规律,并且每一次仿真只是对实际加工过程的一次抽样,因此即使高精度的仿真模型也不能保证得到最优甚至较优的调度方案。

### (9) 组合算法

由于每一种调度方法都有各自的优缺点,将两种算法相结合取长补短是一种很好的思路。所以,除了传统的启发式规则外,近年来人们开始把各种近似算法的组合应用研究作为热点,各种各样的混合算法层出不穷,诸如将启发式规则和遗传算法相结合,提高了遗传算法盲目随机操作的概率,加速了算法的收敛;反过来说,遗传算法本身所具有的随机特性又能在一定程度上弥补启发式算法的强偏差性。

## 1.1.3 柔性车间调度(FJSSP)的研究历史及现状

柔性生产是在刚性生产的基础上发展起来的,上世纪 20 年代在泰勒“科学管理”影响下,工业界将管理思想与当时的电气化、标准化、系列化结合提供了大

量的产品，它存在的基础是当时的市场环境为卖方市场，因而我们也称此生产模式为刚性生产模式。这一模式的生产效率高，单件产品成本低，但它是损失产品的多样化，掩盖产品个性为代价的。随着经济的不断发展，企业的竞争形式也在发生变化，刚性生产模式的弊端逐渐显现，主要表现在：成本增加、过量库存、适应市场的灵敏度低。然而，现代的竞争环境是一个不断变化、不可预测的环境，由于产品的生命周期越来越短，企业所处的竞争环境要求企业具有很高的适应能力，以满足市场的需求。柔性生产模式正是在这一要求的刺激下产生的。

作为制造系统的一个重要性能，对柔性的研究在七十年代末便开始了。但直到 1990 年，Brucker 和 Schlei<sup>[13]</sup>提出了工序可以在多台机器上加工这个新的问题并进行了深入研究，这才标志着具有柔性路径的作业车间调度问题研究的真正开始。他的研究成果引起了学术界的浓厚兴趣作者用遗传代码先确定各工件类型的调度先后顺序，然后用传统的人工智中的 FBS 搜索方法，对各工件的每道工序按顺序进行安排调度。从 1993 年开始，随着禁忌搜索法这种局域搜索法日益受到广泛的应用，Dell, Amieo, Brandimarte, Hurink, Nowieki, Barnes, ouaezer 一 peres 和 Burcker<sup>[13]</sup>等先后采用了禁忌搜索方法对柔性作业车间调度问题进行了求解。在这期间，Jansen 等还利用线性时间近似算法，Vaessens 和 Balas 等利用本地搜索算法求解柔性作业车间调度问题。由于遗传算法具有容易早熟和收敛速度慢等特点，许多学者将遗传算法与一些启发式规则，局域搜索算法进行结合获得了较好的结果。目前，对制造系统柔性的研究主要集中在：

- (1) 柔性作为系统本身的固有性质，如何发挥其全部效用；
- (2) 对系统内各种柔性相互作用的研究；
- (3) 各类柔性对制造系统行为特征，调度策略影响的研究。

#### 1.1.4 车间调度问题研究的发展趋势

调度领域中的大部分问题都具有 NP — hard 问题，并且理论研究与实际应用之间还存在着很大差距。各种近似启发式方法、诸如基于规则的算法等，由于能在合理的时间内产生比较满意的调度，因此广泛应用于实际调度中，但其往往对所得的调度解的次优性不能进行评估。

针对上述存在的问题，目前车间调度问题形成了下面的一些策略和趋势：

- (1) 实用化

一些理论上的最优调度方法能够提供最优调度，但由于计算复杂性大，并且忽略了很多实际的因素，离应用还有很大的差距。因此如何综合运用现有优化算法，真正提高车间调度的信息化水平有待进一步的研究。

## (2) 集成化

探索车间计划与调度的集成。集合回答应该生产什么，而调度则回答怎样生产。两者是相互联系的，应该建立一个集成系统。

## (3) 高效智能化

寻找新的调度算法，该算法应该能够快速、高效的找到大规模调度问题的最优解或次优解，并能对找到的解进行评估。

## (4) 多目标权衡决策

实际调度问题是多目标的，且这些目标往往相互冲突，如何对调度系统的不同目标进行权衡分析，实现多目标调度优化是十分必要的。

(5) 人机交互策略:大量的研究表明人机交互策略可以减小系统的搜索时间，可在有限的时间、背景知识条件下解决一些困难的调度问题。

## (6) 柔性化

在传统的车间调度问题的研究中，仅考虑每一工件具有唯一确定加工工艺路线的情况。随着加工技术、自动化技术的发展，特别是柔性加工系统(MFS)的出现，工件加工工艺路线必须唯一确定的传统限制已被突破，工件具有多个可选择的加工路线，即路径柔性已成为生产的实际需求。

本论文将在以下的章节中对柔性化给予特别描述。

总之，对于生产调度问题的研究，随着应用数学理论的进一步发展，必然朝着实用化、集成化、高效智能化、柔性化的方向发展。本文主要论述的就是柔性化车间调度的研究。

## 1.2 蚁群算法研究

### 1.2.1 蚁群算法的研究现状

蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO 算法)是由意大利学者 M Dorigo, V.Maniezzo, A.Colormi 等人在 20 世纪 90 年代初通过模拟自然界中蚂蚁集体觅食



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库